

# 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界砂岩储层 “酸性+碱性”叠加溶蚀作用与储层质量主控因素

王京<sup>1</sup>, 赵彦超<sup>2</sup>, 刘琨<sup>3</sup>, 王家豪<sup>2</sup>

1. 中国矿业大学(北京)资源学院, 北京 100083

2. 中国地质大学资源学院, 湖北武汉 430074

3. 中国石油天然气股份有限公司, 北京 100011

**摘要:** 从岩石学薄片观察、埋藏史恢复、成岩流体包裹体检测、地层水化学特征和砂岩、粘土矿物成岩作用及储层性能评价等入手,对鄂尔多斯盆地塔巴庙地区上古生界下石盒子—山西组砂岩储层储集性能主控因素进行了初步探讨。研究成果认为:(1)工区下石盒子—山西组砂岩储层在早白垩世达到最大埋深(约4500 m),强压实和高含量岩屑变形以及杂基充填颗粒间,使得砂岩原生粒间孔隙几乎完全丧失,储集空间主要为次生溶蚀孔隙,原生孔隙不发育;(2)碳酸盐胶结物和少量长石及岩屑在中等埋藏深度发生酸性溶蚀,而石英骨架颗粒和泥质、微晶石英杂基在深埋藏阶段发生碱性溶蚀,从而形成“酸性+碱性”叠加溶蚀次生孔隙带,成为控制工区目的层储层质量的主控因素;(3)粘土矿物演化剖面、地层水化学剖面和储层物性与储层岩屑、方解石、自生硅质和填隙物含量关系对比剖面,揭示大约在2670 m附近存在一个重要的界面,在此界面之上为酸性溶蚀带,在此界面之下为先期酸性、后期叠加碱性溶蚀的深部次生孔隙带,其中在2670~2740 m深度段为高孔高渗带,天然气沿此深度带优先充注。因此,这个带也是一个天然气高产带,在今后的勘探应给予高度重视。

**关键词:** 酸性+碱性叠加溶蚀;次生孔隙带;成岩作用;塔巴庙地区。

中图分类号: P618.13

文章编号: 1000-2383(2006)02-0221-08

收稿日期: 2005-07-05

## Superimposing Controls of Acidic and Alkaline Dissolutions on Sandstone Reservoir Quality of the Paleozoic Xiashihezi and Shanxi Formations in Tabamiao Area, Ordos Basin

WANG Jing<sup>1</sup>, ZHAO Yan-chao<sup>2</sup>, LIU Kun<sup>3</sup>, WANG Jia-hao<sup>2</sup>

1. Faculty of Earth Resources, China Ore University, Beijing 100083, China

2. Faculty of Earth Resources China University of Geosciences, Wuhan 430074, China

3. PetroChina Company Limited, Beijing 100011, China

**Abstract:** The main factors controlling the quality of the sandstone reservoirs of the Xiashihezi and Shanxi formations in Tabamiao area, Ordos basin, are discussed through the synthetic investigation of petrologic observation of thin sections, the restoration of burial history, fluid inclusion measurement, a comparison of formation water chemistry with clay minerals and porosity, and a statistical analysis of permeability. The study reveals that at about the end of the Early Cretaceous, the primary porosity of the sandstones seemed to be almost lost due to deep burial (about 4500 m) and strong compaction, causing the soft debris deformation to fill the intergranular pores. However, the acidic dissolution of carbonate minerals and some feldspar, which occurred during the middle diagenesis, produced some secondary pores. During the late diagenetic stage, the alkaline dissolution raised in quartz grains and aluminosilic debris of the same sandstones to form a superimposed secondary porous belt, which has been thought to be the main controlling factor on reservoir quality. The profile of clay mineral con-

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(No. 40238060)。

作者简介: 王京(1963—),女,中国石油勘探开发院海外研究中心高级工程师,主要从事油气田开发地质研究工作,现为中国矿业大学(北京)博士研究生。E-mail: wangjing@cnpcint.com

tents coupled with formation water chemistry, porosity and permeability, contents of debris, calcite, authigenic quartz and matrix clearly indicates that there is a very important contact at about 2 670 m. At this depth, an acidic dissolution in sandstones developed, and beneath this depth, the sandstones underwent the late alkaline dissolution which superimposed on the early acidic dissolution. The strongest dissolution belt occurs between 2 670 and 2 740 m, and was filled with natural gases. Attention should therefore be paid to this belt in future exploration and development.

**Key words:** superimposing of acidic and alkaline dissolutions; secondary dissolved porous belt; diagenesis; Tabamiao area.

### 1 地质背景

塔巴庙地区位于鄂尔多斯盆地东部陕—蒙交界处,总勘探面积 2 004. 8 km<sup>2</sup>(图 1)。塔巴庙鼻状隆起是一个自北向南倾伏的、加里东期为台型、印支—燕山期才形成鼻状的复合性构造带(刘锋和李前进, 1997)。区内自奥陶纪末期抬升遭受长期风化剥蚀,从石炭纪开始接受了本溪—太原组海陆过渡相、二叠纪山西组、下石盒子组、上石盒子组和石千峰组以及三叠系、侏罗系、白垩系、第四系等陆相碎屑岩沉积。

1985 年伊 24 井在二叠系喜获工业天然气流,

从此揭开了上古生界天然气勘探的序幕。然而,随着勘探程度的不断深入,二叠系石盒子组、山西组碎屑岩储层质量主控因素及其时一空特征已成为工区进一步勘探的突出矛盾之一。强烈的储层非均质性和低孔低渗造成单井产量低,产量衰减快。因此,尽快查明工区二叠系储层主控因素,寻找相对高孔高渗带是目前最为迫切的研究课题。

基于此,本文在系统描述工区 16 口钻井岩心、鉴定 7 口井共 473 块岩石学薄片、系统测定了 71 块流体包裹体样品、分析扫描电镜照片 121 幅、综合分析地层水化学、孔渗数据、粘土 XRD 全定量分析数据、地层测试温—压数据等近万件,并消化和吸收了前人在工区成岩与储层评价方面的研究成果(陈丽华等,1999;林玉祥,2001;惠宽洋等,2002)的基础上,在微观尺度上从固相和流体相 2 个方面系统研究了工区二叠系目的层下石盒子—山西组碎屑岩储层成岩作用类型、成岩演化及其对储层质量的影响,结合精细埋藏史恢复,进而探索控制其储层质量的主控因素及时一空展布特征。

### 2 储层成岩作用特征

#### 2.1 储层岩石学特征

塔巴庙地区上古生界下石盒子—山西组碎屑岩储层主要为中—粗粒岩屑石英砂岩、含砾岩屑石英粗砂岩,其次为细—中粒岩屑石英砂岩、岩屑石英细砂岩,部分为岩屑石英极细粉砂岩。骨架颗粒磨圆为次圆—次棱角状。细粉砂—极细粉砂岩粒间多为泥质、隐微晶硅质杂基基底式充填;而中—粗砂岩和细—中砂岩颗粒之间多以线接触为主,部分为凹凸接触和压溶缝合线接触;见斑块状菱铁矿基底式胶结和斑块、斑点状方解石胶结和交代泥质、隐微晶硅质杂基和岩屑。该套砂岩储层最为显著的特点包括以下 5 点:

(1)砂岩骨架颗粒成分以石英、岩屑岩为主,长石含量极低或没有。碎屑石英颗粒主要为单晶、多晶

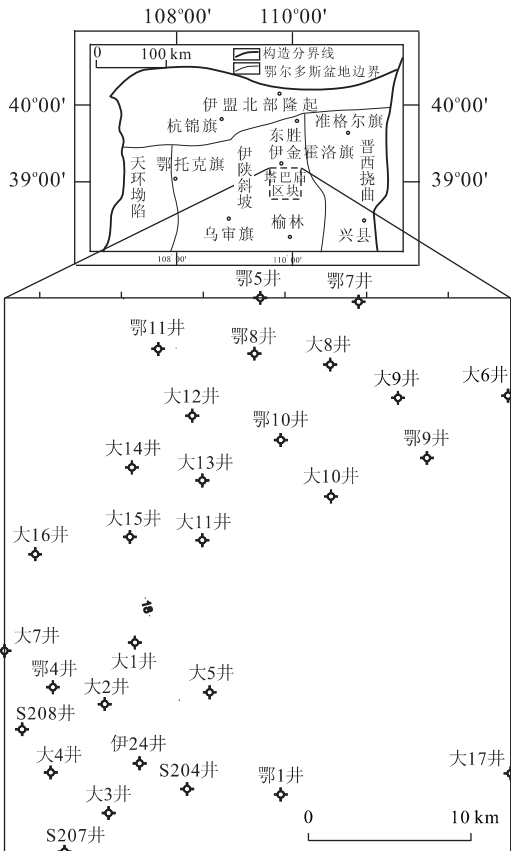


图 1 鄂尔多斯盆地塔巴庙地区构造位置及钻井分布

Fig. 1 Structural location and well distribution of Tabamiao area in Ordos basin

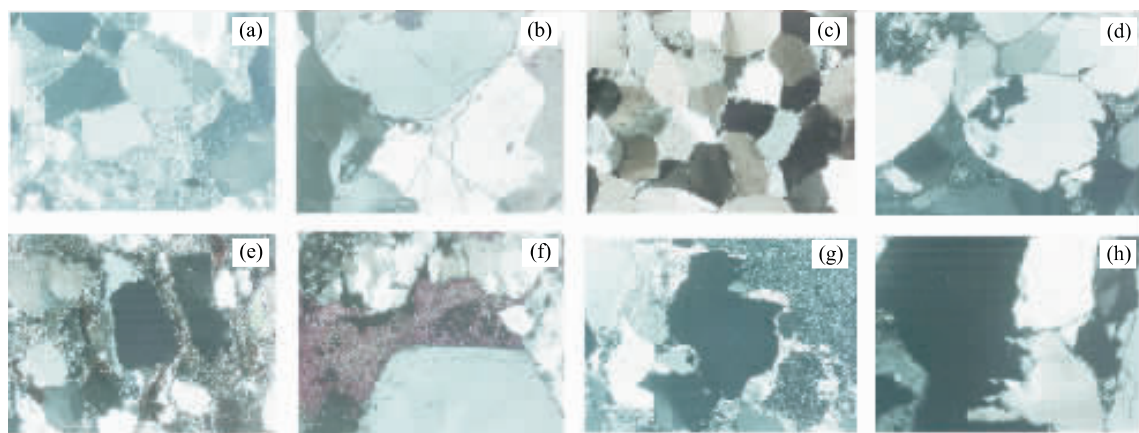


图 2 储层岩石学特征

Fig. 2 Petrological characters of sandstone reservoir

a. 大探 1 井, 2 786.00~2 786.13 m; b. 大 14 井, 2 788.58 m; c. 大 12 井, 2 742.80 m; d. 大探 1 井, 2 843.10 m; e. 大 12 井, 2 781.84 m; f. 大 12 井, 2 752.28 m; g. 大探 1 井, 2 834.02 m; h. 大 12 井, 2 784.88 m, a—h.  $\times 100$ , 正交偏光

石英组成, 少量燧石; 岩屑含量比较高, 多为抗风化的隐微晶硅质碎屑, 极少见成分成熟度低的、含暗色矿物的岩屑。杂基中除泥质以外, 还含大量隐微晶硅质颗粒。砾状砂岩中的砾石多为岩屑。石英颗粒分选中等, 磨圆次圆—次棱, 多发育石英次生加边。

砂岩中长石多为钾长石, 含量介于 0%~61% 之间。除大 1 井盒一、盒二段局部达到 40%~61% 含量之外, 一般含量普遍很低, 低于平均值 3.39%。前人认为, 造成砂岩中长石含量普遍较低的原因主要是砂岩长石高岭石化严重, 大部分长石已蚀变为高岭石(惠宽洋等, 2002)。砂岩中岩屑组分多为中酸性喷出岩微晶、粉晶长英质集合体, 少量花岗岩、变质岩和沉积岩岩屑; 在山西一下石盒子组砂岩中岩屑含量 2%~89%, 平均 25.1%, 除少量石英砂岩之外, 分布普遍。

(2) 砂岩中杂基为泥质、隐微晶硅质, 其含量 0.2%~98%, 平均 8.5%, 一般低于 10%, 但分布普遍, 成为填隙物; 局部杂基含量高呈基底式, 颗粒呈漂浮状(图 2a)。杂基含量不仅与沉积环境水动力有关, 还与水介质有关。根据对上述 7 口井岩石薄片观察, 即使是分流水道砂砾岩沉积, 也有杂基发育。

(3) 砂岩中胶结物成分主要为: (a) 泥微晶菱铁矿, 含量 0.1%~4.5%, 平均 3.54%, 呈斑块状基底式胶结, 并发育晶内溶孔; (b) 微粉晶方解石和 Fe—方解石, 含量 0.2%~40%, 平均 4.68%, 呈斑点状胶结和交代岩屑及杂基, 局部连晶基底式胶结使骨架颗粒呈漂浮状, 并发育晶内、晶间溶孔; (c) 粉晶 Fe—白云石, 含量 0.2%~20%, 平均 2.46%, 呈斑

点状交代岩屑; (d) 自生石英加大边和单晶, 含量 0.1%~7.0%, 平均 1.88%, 次生加大程度依据早期碳酸盐胶结程度和杂基含量高低而变化, 即早期碳酸盐胶结弱、杂基含量低的岩屑石英砂岩, 常常发育周缘状石英次生加大(图 2b)。从石英次生加大边与颗粒接触关系以及与碳酸盐胶结物共生关系判断, 加大作用开始于菱铁矿胶结之后、方解石(Fe—方解石)胶结—交代和强压实之前。

(4) 砂岩曾经遭受强压实呈线接触为主, 颗粒定向明显, 堆积紧密; 岩屑及杂基因强压实而变形充填于粒间孔隙之中。

(5) 储层原生孔隙因强压实、软性颗粒压实变形充填粒隙而几乎丧失殆尽, 而储集空间以骨架颗粒、杂基、胶结物溶蚀次生孔隙为主。

## 2.2 储层成岩作用类型

根据对工区 7 口井岩石学薄片详细观察、描述, 结合扫描电镜照片、粘土矿物分析、电子探针分析和同位素分析成果以及流体包裹体分析成果, 本文将工区山西一下石盒子组砂岩储层主要成岩作用类型归纳如下。

2.2.1 压实作用 工区下石盒子—山西组砂岩储层经历了较强—很强的压实。薄片观察表明: (1) 颗粒定向排列明显; (2) 杂基和岩屑等“软”组分因强压实而变形填于粒间, 对储层原生孔隙保存极为不利; (3) 大部分骨架颗粒、特别是石英颗粒呈线接触、凹凸接触、甚至缝合线接触(图 2c)。

以大 1 井为代表的精细埋藏史恢复(图 3)表明, 下石盒子—山西组从三叠纪开始进入中等埋藏

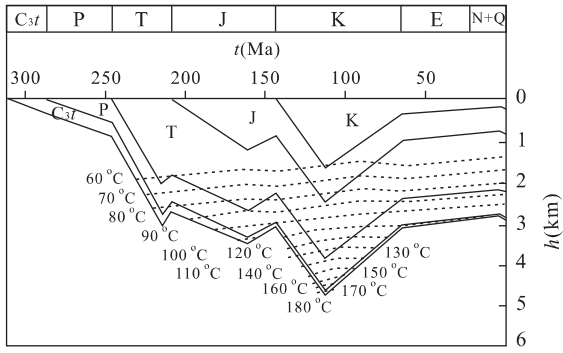


图 3 大 1 井埋藏史图

Fig. 3 Diagram of Da 1 well burial history

阶段,侏罗纪进入中—深埋藏阶段,早白垩世进入深埋藏阶段。尽管本区经历了石炭—三叠纪末、早侏罗世—晚侏罗世末和早白垩世—中—晚侏罗世末 3 次沉降—抬升旋回,但对储层压实影响最大的还是早侏罗世达到的最大埋深,从而导致其砂岩储层强压实。自中—晚侏罗世开始抬升,第三纪一直处于中等埋藏深度;第四纪有轻微沉降。

**2.2.2 胶结、交代作用** 薄片观察和流体包裹体测定 (Goldstein and James, 1994; Isaksen *et al.*, 1998) 表明,这套砂岩胶结作用主要为:(1)菱铁矿沉淀温度低于  $50\sim 60\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,形成于早成岩阶段,呈泥微晶集合体生长于粒间,局部层段斑块状基底式胶结岩屑石英砂岩;(2)方解石沉淀温度介于  $101.9\sim 124.9\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,形成于中—浅埋藏阶段,呈微粉晶方解石斑点状亮晶胶结岩屑石英砂岩,个别层段含量较高,可达  $20\%\sim 26\%$ ,并发育晶间、晶内溶孔;(3)Fe—方解石交代:中—深埋藏阶段,主要呈斑点状交代岩屑和杂基,并伴随大量岩屑和杂基溶蚀孔发育;(4)Fe—白云石交代:深埋藏阶段,主要呈斑点状菱形白云石交代岩屑;(5)自生石英加大边:尽管十分普遍,但与发生加大时期砂岩渗透能力有关;如果渗透能力强、杂基含量低、碳酸盐胶结程度低,可发生周缘状石英次生加大,否则,仅见边状和点状石英次生加大。局部单晶自生石英填于粒间。石英次生加大边流体包裹体检测表明发育四期(含气)盐水包裹体:第一期均一温度  $75\sim 95\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,第二期  $100\sim 130\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,第三期  $140\sim 165\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,第四期  $170\sim 180\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由此可见,石英次生加大从中—浅埋藏阶段就已经开始,一直持续到深埋藏阶段。十分有趣的是,大 1 井  $2842.90\text{ m}(\text{P}_{15}^1)$ —石英次生加大边内侧盐水包裹体均一温度为  $T_h=170.2\sim 176.8\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,初始融化温

度  $T_m=-8.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;而外测为  $T_h=158.4\sim 171.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,初始融化温度  $T_m=-2.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。这说明该石英次生加大边内侧捕获的盐水包裹体记录了最大埋藏时期的古地温和高盐度,石英次生加大边外侧捕获的盐水包裹体记录了后期抬升地温下降时的古地温和较低的盐度;(6)自生粘土沉淀:电镜观察主要为书页状高岭石、火焰状伊利石和鳞片状绿泥石附着于颗粒或孔隙壁上,常常在自生石英沉淀间歇期沉淀成粘土迹;(7)粘土泥化作用:长石高岭石化和局部泥质杂基高岭石化。

**2.2.3 溶蚀作用** 溶蚀作用是工区下石盒子—山西组砂岩储层次生孔隙产生最为主导的因素。从被溶蚀的对象可分为骨架颗粒(长石、石英、岩屑)粒内溶蚀(图 2d)和颗粒全部溶蚀(铸模孔)(图 2e)、胶结物(菱铁矿、方解石、Fe—方解石)晶内和晶间溶蚀(图 2f)以及泥质和隐微晶硅质杂基溶蚀(图 2g)3 种类型;从溶蚀介质化学性质可分为酸性溶蚀和碱性溶蚀两大类,其中酸性溶蚀主要对象为碳酸盐胶结物、长石等,而碱性溶蚀对象为石英颗粒(包括次生加大边)、硅质岩屑和隐微晶硅质杂基等。

**2.2.4 裂缝化作用** 本研究仅观察了大探 1、大 6、大 8、大 9、大 12、大 13 和大 14 等 7 口井下石盒子—山西组岩石薄片,发现大探 1 井和大 14 井微观裂缝最为发育,伴随裂缝溶蚀作用也最为显著。多见一组近垂直颗粒长轴方向,即高角度裂缝,成阶步状,推测为张性裂缝;少数见 2 组 X 型剪切裂缝;另一组为绕着石英刚性颗粒分布的裂缝,推测为是卸荷裂缝,在抬升过程中形成。

### 2.2.5 粘土矿物演化

根据粘土矿物—深度剖面(图 4)可看出,工区下石盒子—山西组中伊利石含量从  $2600\text{ m}$  左右的  $20\%$ ,到  $2800\text{ m}$  增加到近  $90\%$ ,而绿泥石含量从近  $60\%$  下降到  $5\%$  左右, $2800\text{ m}$  是伊利石和绿泥石的一个分界点深度,二者呈镜像关系。高岭石是酸碱度的灵敏度指标,在  $2600\sim 2700\text{ m}$  和  $2700\sim 2800\text{ m}$  之间有 2 个含量高峰值,岩石薄片和电镜扫描观察主要为长石、岩屑和杂基蚀变高岭石以及自生高岭石,代表油气运聚高峰期之前有机酸溶蚀作用的产物 (Surdam *et al.*, 1989)。I/S 混层矿物含量以及 S 层含量均指示  $2670\text{ m}$  附近是含气热流体充注的顶界,而该深度恰好是盒二段与盒一段的界限深度。同时,在此深度以下薄片观察到大量石英颗粒(包括石英次生加大边)的溶蚀和岩屑、泥质和隐微晶硅质

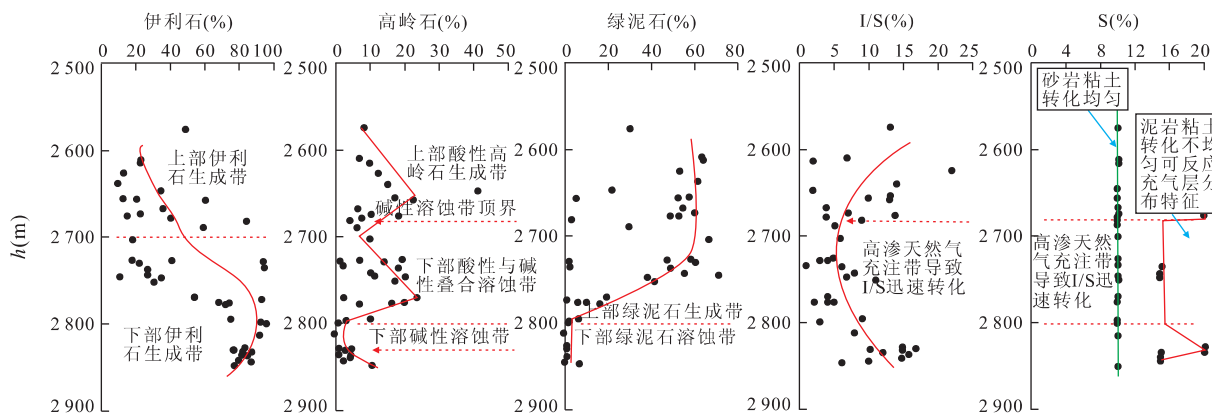


图 4 塔巴庙地区上古生界粘土矿物剖面

Fig. 4 Plots of clay mineral contents vs. depth of the upper Paleozoic in Tabamiao area  
依据大 1、大探 1、大 3、大 9、大 10、大 11~大 14 等井 XRD 全定量分析数据

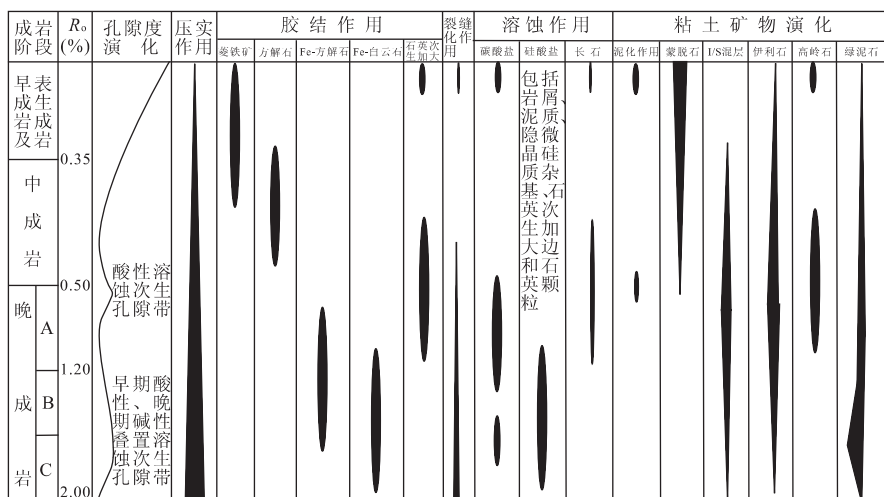


图 5 塔巴庙地区上古生界砂岩储层成岩作用综合柱状图

Fig. 5 Synthetic column diagram of diagenesis for the upper Paleozoic sandstone reservoirs in Tabamiao area

杂基溶蚀孔发育、溶蚀程度深的成铸模孔。因此，认为大约在 2 670 m 以上盒二段以酸性溶蚀为主，而在该深度之下的盒一段既发育先期的酸性溶蚀，又发育深埋藏碱性溶蚀，即“酸性+碱性”叠加溶蚀，其中 2 700 m 附近碱性溶蚀最为强烈，成为工区储层质量最好的深部叠合溶蚀次生孔隙增生带，其依据有：(1)该段高岭石含量最低；(2)石英颗粒等硅质溶蚀最为强烈；(3)I/S 混层粘土和 S 层含量指示该带为高温含气热流体充注带(孙永传等, 1995)。

**2.2.6 下石盒子组—山西组砂岩储层成岩作用演化序列** 根据上文的岩石学特征观察、成岩作用研究以及精细埋藏史恢复结果，我们就可以归纳出工区下石盒子—山西组砂岩储层的成岩作用序列(图 5)。

早成岩阶段：从沉积开始至粘土第一次脱水之

前，相当于镜质体反射率  $R_0 \leq 0.35\%$  阶段，发生的主要成岩作用有隐微晶菱铁矿集合体沉淀；颗粒粘土边形成；沉积物压实率极高，孔隙度衰减速率大，大量同生孔隙水通过薄膜渗透排出孔隙使得孔隙水进一步浓缩，因电解质作用河水携带的胶体  $\text{SiO}_2$  将沉淀在石英颗粒孔隙内和边缘，也可出现豆芽状次生加大。

中成岩阶段：相当于镜质体反射率  $R_0$  介于  $0.35\% \sim 0.50\%$  阶段，蒙脱石向 I/S 混层转化，并释放大量过剩  $\text{SiO}_2$  和  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，开始发育石英次生加大，方解石沉淀胶结、交代岩屑和杂基；同时有机质开始释放有机酸，对长石、岩屑和杂基中长石质微粒以及胶结、交代碳酸盐(方解石、菱铁矿)进行溶蚀，形成第一个次生孔隙增生带(即酸性溶蚀带)。

晚成岩阶段：一般分为 A、B、C 三期；其中晚成

岩 A 期相当于镜质体反射率  $R_o$  介于 0.50% ~ 1.20% 之间,主要发生大量石英次生加大和碳酸盐、长石溶蚀作用,同时开始出现 Fe-方解石胶结作用,长石泥化作用;晚成岩 B 期相当于镜质体反射率  $R_o > 1.20%$ ,粘土开始第二次脱水,I/S 混层有序度达 80% 左右,同时 III 型干酪根开始大量生气阶段,出现白云石、Fe-白云石交代岩屑,石英颗粒出现线接触压实,孔隙水又酸性溶蚀逐渐变为碱性溶蚀,硅质(包括硅质岩屑、杂基和石英颗粒及其次生加大边)开始出现溶蚀;晚成岩 C 期代表盆地深沉降最大阶段,目的层埋藏深度最大逾 4 000 ~ 4 500 m(图 3),此阶段,除了大量碱性溶蚀和 Fe-白云石交代之外,还有大量绿泥石生成和裂缝生成。

表生成岩阶段:指抬升至地表遭受大气淡水淋滤作用以及卸荷作用。工区目的层下石盒子—山西组在三叠纪末、侏罗纪末和早白垩世末至第三纪的抬升均没有直接暴露地表,因而,表生成岩作用并不明显,只是因为从中—晚白垩世开始至第三纪一直处于抬升过程,见到少量卸荷裂缝发育。

### 3 下石盒子—山西组砂岩储层质量主控因素及垂向展布特征

#### 3.1 储层地层水特征

次生孔隙是水/岩反应和有机/无机相互作用的结果。前人研究碎屑岩天然气储集层次生孔隙有 3 种成因机理(陈丽华等,1999):(1)煤系天然气储集层中有机酸及二氧化碳酸性水的溶解;(2)深层储层

热对流溶蚀;(3)表生淋滤和断层损伤带淋滤。然而,工区目的层下石盒子—山西组砂岩储层发育大量碱性溶蚀的证据。

塔巴庙地区上古生界地层水化学剖面(图 6)展示了今地层中的地层水矿化度、总碱度、pH 值、总阴离子和总阳离子含量的分布关系。

从矿化度、总阴离子含量和总阳离子含量来看,大约在 2 700 m 以下(盒二段)为高矿化度带,  $CaCl_2$  水型;大约在 2 670~2 700 m 之间为最低矿化度带,也是高含气带;而在 2 670 m 之上局部层位为强碱性带(pH 值大于 9.0),总体 pH 小于 7.0。众所周知,地层测试获得的地层水样品既是受到一定程度钻井污染了,又没有保持地层挥发份组分的地层水,其 pH 值只是具有参考意义。但是,从图 6 可以看出,大约 2 700 m 以下高矿化度带和 2 670 m 以上低矿化度带,中间夹了一个极低矿化度带(受充气的影响)。由此进一步证实了前文粘土矿物分析的结果,即 2 670 m 附近不仅是一个重要地层界面(盒二段/盒一段),也是一个重要的有机(天然气)/无机(地层水)作用界面,同时也是一个粘土演化界面。而造成这样一个重要的分界,关键在于地层流体运动。可以设想,在 2 670 m 以下的盒一段砂岩在经历有机酸和二氧化碳弱酸溶蚀之后,形成了一定的酸性溶蚀孔隙;随着埋藏,再度经历了强碱性溶蚀,形成工区深层次生孔隙最为发育的叠合溶蚀孔隙带;在此基础上,天然气沿此高孔高渗带充注(刘新折等,2000;付金华等,2000)。因此,该带是工区天然气高产带。

#### 3.2 储层物性特征

上文从埋藏史、成岩作用、粘土矿物演化以及地

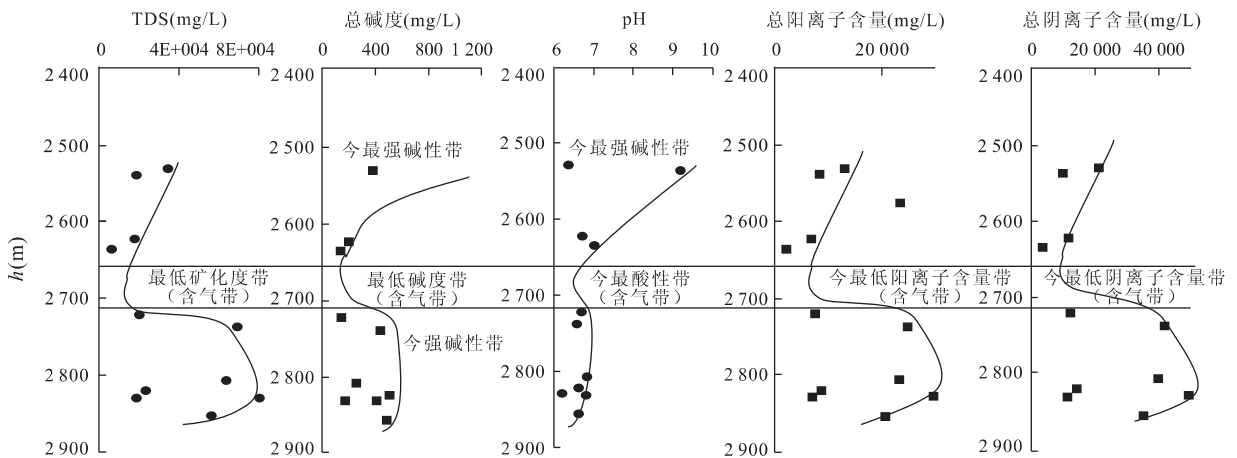


图 6 塔巴庙地区上古生界地层水参数剖面

Fig. 6 Plots of several parameters of the upper Paleozoic formation water vs. depth in Tabamiao area

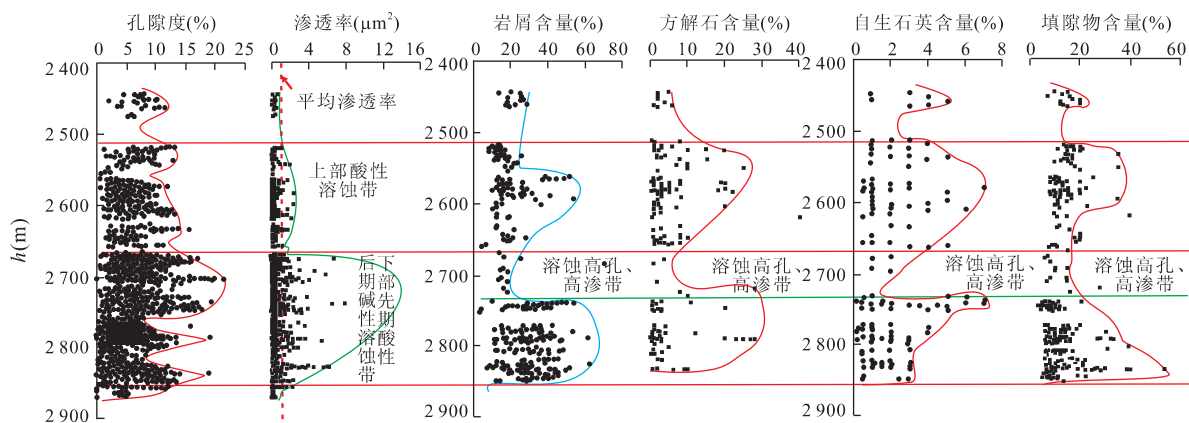


图 7 塔巴庙地区上古生界砂岩储层孔隙度、渗透率和岩屑—方解石和石英胶结物以及填隙物含量随深度变化关系对比  
 Fig. 7 Plot of porosity, permeability and contents of debris, cements (calcite and quartz) and matrix vs. depth in the Upper Paleozoic of Tabamiao area

层水化学等诸方面研究了工区目的层下石盒子—山西组砂岩储层,最为重要的目的之一是探讨其控制储层质量的主导因素及其时—空展布特征,为工区下一步勘探开发提供有益的决策依据。

由于该套砂岩属于辫状河平原相分流水道和滨浅湖相沉积(魏红红等,1998),河水携带大量的泥质和岩屑,在经历石英次生加大、碳酸盐胶结和强压实成岩作用之后,杂基和变形岩屑填充于除线接触之外所有的粒间孔隙,原生孔隙几乎完全丧失,剩下的只能靠溶蚀作用和裂缝化作用,形成次生孔隙。然而,溶蚀作用涉及到 3 个问题:一是溶剂的化学性质;二是存在可溶蚀溶质;三是发育可供流体作用的界面或通道。对于酸性(有机酸和弱碳酸)溶蚀而言,碳酸盐胶结物、长石是被溶蚀的对象;对于碱性溶蚀(粘土转化)而言,泥质、隐微晶长英质杂基和岩屑以及石英颗粒和加大边都是溶蚀的对象。从这个角度来看,发育碳酸盐胶结物、杂基和岩屑含量高,反而有利于次生孔隙的形成。事实上也是如此,很纯的石英粗砂岩因强压实孔隙度也很低。

一般酸性溶蚀作用发生在前期,碱性溶蚀作用发生在晚期;酸性溶蚀为进一步碱性溶蚀提供了良好的“通道”条件。工区目的层下石盒子—山西组砂岩的碳酸盐胶结物和长石溶蚀与杂基溶蚀、岩屑溶蚀、甚至石英溶蚀常常在空间上是伴生的。这就是本研究提出深部“酸性+碱性”叠合溶蚀次生孔隙增生带的理论依据。

图 7 是孔隙度—渗透率—岩屑含量—方解石含量—自生石英含量—填隙物含量与深度关系图。从中可看出,目的层砂岩储层基本属于低孔低渗、中孔

低渗以及少量高孔中渗型储层;同样大约以 2 670 m 为界,上部酸性溶蚀带对应于较高岩屑、方解石、自生石英(加大边)和填隙物含量深度段;而 2 670 m 以下的下部相对高孔高渗带同样对应于较高岩屑、方解石、自生石英(加大边)和填隙物含量深度段,与之不同的一点是大约在 2 670~2 740 m 深度段不仅方解石含量急剧降低,而且岩屑、自生石英和填隙物含量都急剧降低;从薄片观察发现不仅有碳酸盐溶蚀,而且还有大量硅质溶蚀(图 2h)。因此,我们首次识别出这是一个深部先期酸性、后期叠加碱性溶蚀的次生孔隙增生带。

#### 4 结论

通过上述研究,获得如下认识:(1)沉积—成岩条件决定了塔巴庙地区下石盒子—山西组砂岩储层原生孔隙不发育;骨架颗粒中长石含量偏低,主要原因可能在于母岩类型和长距离远源搬运沉积;存在长石溶蚀,但不是造成长石含量低的原因。换句话说,长石溶蚀次生孔隙难以成为控制储层的主导因素。

(2)砂岩储层岩屑含量高,对工区目的层碱性溶蚀次生孔隙形成是有利的,但其蚀变残留粘土易附着孔隙壁和堵塞喉道,造成渗透率急剧降低。这可能是造成工区上古生界砂岩储层中—高孔而低渗的主要原因。

(3)杂基与储层物性关系具有两面性:(a)对原生孔隙而言,杂基填于粒间,不利于原生孔隙发育;(b)对于酸性溶蚀(长石)和碱性溶蚀(硅质)次生孔隙形成而言,杂基的发育反而有利这种次生孔隙的形成。

(4)工区下石盒子—山西组砂岩储层在早白垩世达到最大埋深(约 4 500 m),强压实和高含量岩屑变形以及杂基充填粒间,使得原生粒间孔隙几乎完全丧失;而石英次生加大发生在中成岩—晚成岩阶段,方解石胶结和交代稍稍晚于次生加大;碳酸盐胶结物和长石酸性溶蚀作用发生于中成岩晚期;硅质溶蚀作用发生在早白垩世的深埋藏碱性环境。

(5)储层成岩作用和物性关系清楚地表明,控制工区下石盒子—山西组砂岩储层质量的主导因素是溶蚀作用,而酸性溶蚀作用受制于碳酸盐胶结物含量和分布,碱性溶蚀主要与隐微晶硅质杂基和岩屑以及石英含量和分布有关,还需要发育先存渗透性通道条件。

(6)本研究首次揭示出工区大约在 2 670 m 附近存在一个重要的界面,在此界面之上为酸性溶蚀带,在此界面之下为先期酸性、后期叠加碱性溶蚀的深部次生孔隙带,其中在 2 670~2 740 m 深度段为高孔高渗带,天然气沿此深度带优先充注。因此,这个带也是一个天然气高产带,在今后的勘探应给予高度重视。

## References

Chen, L. H., Zhao, C. L., Ji, Y. L., et al., 1999. Three formation mechanisms of secondary porosity in clastic gas reservoir rocks. *Petroleum Exploration and Development*, 26(5): 77—81 (in Chinese with English abstract).

Fu, J. H., Duan, X. W., Xi, S. L., et al., 2000. Geological characteristics and exploration methods of natural gas reservoir in Ordos basin. *Low Permeability Oil-Gas Reservoir*, 5(3): 20—29 (in Chinese with English abstract).

Goldstein, R. H., James, R. T., 1994. Systematics of fluid inclusions in diagenetic Minerals. SEPM Short Course Oklahoma, 31.

Hui, K. Y., Zhang, S. N., Li, D. M., et al., 2002. Reservoir petrology and diagenesis of lower Shihezi Formation and Shanxi Formation in northern Ordos basin. *Journal of Chengdu University of Technology*, 29(3): 272—278 (in Chinese with English abstract).

Isaksen, G. H., Pottorf, R. J., Jenssen, A. I., 1998. Correlation of fluid inclusions and reservoir oils to infer trap fill history in the South Viking Graben, North Sea. *Petroleum Geoscience*, 4: 41—55.

Lin, Y. X., 2001. Formation conditions and model for coal type gas reservoir in the Jiyang district. *The postdoctoral research report* (in Chinese).

Liu, F., Li, Q. J., 1997. Exploration achievements and recognition of natural gas in northern of Ordos basin and Tabamiao. *Jour. Geol. & Minerals North China*, 12(4): 365—370 (in Chinese with English abstract).

Liu, X. Z., Xi, S. L., Fu, J. H., et al., 2000. Natural gas generation in the Upper Paleozoic in Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 19—23 (in Chinese with English abstract).

Sun, Y. C., Chen, H. H., Li, H. S., et al., 1995. Thermal fluid flows and their organic/inorganic diagenetic responses in YA13-1 gas field of Yinggehai-Qiongdongnan basins, South China Sea. *Earth Science—Journal of China University of Geosciences*, 20(3): 276—282.

Surdam, R. C., Crossey, L. J., Hagen, E. S., et al., 1989. Organic-inorganic interactions and sandstone diagenesis. *AAPG Bulletin*, 73(1): 1—23.

Wei, H. H., Peng, H. Q., Li, J. Q., et al., 1998. Sedimentary and reservoir characters of Permo-Carboniferous in Ordos basin. *Oil & Gas Geology*, 19(2): 136—141 (in Chinese with English abstract).

Yang, H., Zhang, J., Wang, F. Y., et al., 2000. Characteristic of Paleozoic gas system in Ordos basin. *Natural Gas Industry*, 20(6): 7—11 (in Chinese with English abstract).

## 附中文参考文献

陈丽华, 赵澄林, 纪友亮, 等, 1999. 碎屑岩天然气储集层次生孔隙的三种成因机理. *石油勘探与开发*, 26(5): 77—81.

付金华, 段晓文, 席胜利, 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气成藏地质特征及勘探方法. *低渗透油气田*, 5(3): 20—29.

惠宽洋, 张哨楠, 李德敏, 等, 2002. 鄂尔多斯盆地北部下石盒子组—山西组储层岩石学和成岩作用. *成都理工学院学报*, 29(3): 272—278.

林玉祥, 2001. 济阳探区煤型气藏形成条件与成藏模式. 博士后研究报告.

刘锋, 李前进, 1997. 鄂尔多斯盆地北部及塔巴庙天然气勘探成果及认识. *华北地质矿产杂志*, 12(4): 365—370.

刘新折, 席胜利, 付金华, 等, 2000. 鄂尔多斯盆地上古生界天然气生成. *天然气工业*, 20(6): 19—23.

孙永传, 陈红汉, 李惠生, 等, 1995. 莺—琼盆地 YA13-1 气田热流体活动与有机/无机成岩响应. *地球科学——中国地质大学学报*, 20(3): 276—281.

魏红红, 彭惠群, 李静群, 等, 1998. 鄂尔多斯盆地石炭—二叠系沉积特征与储集条件. *石油与天然气地质*, 19(2): 136—141.

杨华, 张军, 王飞雁, 等, 2000. 鄂尔多斯盆地古生界含气系统特征. *天然气工业*, 20(6): 7—11.